

## Study and Analysis of the Flow and Cavitation Field around the KVLCC2-rudder using CFD

Dr. Michel Barbahan\*

Dr. Sayr Sliba\*\*

Ghaeth Mayhoub\*\*\*

(Received 20 / 3 / 2024. Accepted 22 / 7 / 2024)

### □ ABSTRACT □

This research studied and analyzed the flow and cavitation field around the KVLCC2-rudder which has NACA0018 hydrofoil section. Firstly, numerical calculations were performed using CFD on the NACA0018 wing experimentally tested by Gim 2013 [1] with different Angles of Attack (AoA). Comparison between the numerical and experimental results showed the accuracy of the CFD technique in performing such calculations. The URANS equations (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) and the  $k - \omega$  SST turbulence model which are available in the Ansys-Fluent program were used to solve the Navier-Stokes equations. CFD was then used to calculate and analyze the flow around the rudder of the KVLCC2 ship with different AoA and at different Froude numbers. The results of this study confirmed that with a small AoA of the rudder  $\leq 10$  degrees, the flow around the rudder body remains stable, and no reverse flow is formed behind the rudder, while with a large AoA, the area of reverse flow behind the rudder increases, and after AoA 22.5 degrees, the effectiveness of the rudder begins to decrease. The results confirmed that the cavitation formation around the rudder is related to both the AoA and the critical cavitation number, as a decrease in the value of the critical cavitation number greatly increases the probability of cavitation formation around the rudder.

**Keywords:** KVLCC2-rudder, NACA0018, ANSYS-Fluent, Cavitation.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\* Prof. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: [dr.michelyouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy](mailto:dr.michelyouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy)

\* Prof. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: [sayrsliba64@gmail.com](mailto:sayrsliba64@gmail.com)

\*\*\* PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: [gharth.mayhoub@tishreen.edu.sy](mailto:gharth.mayhoub@tishreen.edu.sy)

## دراسة وتحليل حقل التدفق والتكهف حول دفة السفينة KVLCC2 باستخدام CFD

د. ميشيل بربهان\*

د. سائر صليبيه\*\*

غيث ميهوب\*\*\*

(تاريخ الإيداع 20 / 3 / 2024. قُبِلَ للنشر في 22 / 7 / 2024)

### □ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة وتحليل حقل التدفق والتكهف حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2 ذات مقطع NACA0018. تم في البداية إجراء الحسابات الرقمية باستخدام تقنية الـ CFD على الجناح الرفع الذي تم اختياره تجريبياً من قبل Gim 2013 [1] مع زوايا انحراف مختلفة للجناح. المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية أظهرت دقة تقنية الـ CFD في إجراء مثل هذه الحسابات. تم استخدام معادلات الـ URANS (Unsteady RANS) Averaged Navier Stocks Equation) والموديل الرياضي  $k-\epsilon$  SST والمطورة ضمن برنامج الـ Ansys-Fluent لحل معادلات نافيه ستوكس. بعد ذلك تم استخدام CFD من أجل حساب وتحليل التدفق حول بدن دفة السفينة KVLCC2 مع زوايا انحراف مختلفة وعند قيم مختلفة لرقم فرود. أكدت نتائج هذه الدراسة على أنه مع زوايا الانحراف الصغيرة للدفة  $\geq 10$  درجة، فإن التدفق حول بدن الدفة يبقى مستقراً ولا يتشكل تدفق عكسي خلف الدفة، في حين مع زوايا الانحراف الكبيرة تزداد مساحة التدفق العكسي خلف الدفة وبعد زاوية الانحراف 22.5 درجة تبدأ فعالية الدفة بالانخفاض. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد أن تشكل التكهف حول الدفة يرتبط بكل من زاوية الانحراف ورقم التكهف الحدي، حيث أن انخفاض قيمة رقم التكهف الحدي يزيد من احتمال تشكل التكهف بشكل كبير حول الدفة.

الكلمات المفتاحية: دفة ناقلة النفط KVLCC2، NACA0018، برنامج الـ Ansys-Fluent، التكهف.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

الايمل: [dr.michelyouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy](mailto:dr.michelyouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy)

\*\* أستاذ - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

الايمل: [savrsliba64@gmail.com](mailto:savrsliba64@gmail.com)

\*\*\* طالب دكتوراه - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

الايمل: [gharth.mavhoub@tishreen.edu.sy](mailto:gharth.mavhoub@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

تُعدّ الدفة الجهاز الرئيسي للسيطرة على المركبات البحرية والتحكم في أداء المناورة للسفينة، لذلك توضع في مؤخرة السفينة خلف الرفاص للاستفادة من طاقة التدفق الناتج عن الرفاص وزيادة كفاءة الدفع. تتكون الدفة عادةً من سطح متحرك واحد أو مجموعة من الأجزاء الثابتة والمتحركة إذ تلعب دوراً أساسياً في تحريض قوى التحكم للاستجابة لحركة المياه. تحدّد القوى والعزوم المؤثرة على السفينة والناتجة عن تحريك الدفة قدرة السفينة على المناورة.

يعتبر المتبادل بين الدفة والرفاص وبدن السفينة أحد المشاكل الرئيسية في الهيدروديناميك البحري والتي ترتبط ارتباطاً مباشراً بسرعة السفن البحرية وقدرتها على المناورة [2]، حيث تنعكس التأثيرات الفعالة بين الدفة والرفاص بشكل كبير على كفاءة الدفع وعلى قابلية السفينة على المناورة. لهذا السبب، من الضروري دراسة هذه التأثيرات بشكل أعمق وتفصيلي بهدف تحسين الدفع الناتج عن الرفاص وأداء الدفة أثناء عملية المناورة وهو ما يؤدي بدوره إلى توفير الطاقة والوقود اللازم.

نتج الكثير من الدراسات حالياً إلى استخدام تقنيات مختلفة لتحسين التأثير المتبادل بين الدفة والرفاص للوصول به إلى الشكل الأمثل مثل استخدام الرفاصات المزودة بنفق مجوف أو إضافة زعانف جانبية أو استخدام أجنحة (NACA) المخصصة للاستخدام البحري فقط في الدفات أو كل ما سبق.

منذ تأسيسها، كرست وكالة ناسا جهودها للنهوض بعلم الطيران والفضاء. حيث قامت بتطوير واختبار الكثير من الأجنحة الرافعة. يعتبر بروفايل NACA0018 من أكثر البروفائلات استخداماً في الكثير من المجالات التي تخص الأجنحة الرافعة، كما يتم استخدامه مع الكثير من أنواع الدفات البحرية. على سبيل المثال لا الحصر يتم استخدامها كثيراً مع سفن الصب وناقلات النفط، ونذكر مثلاً أنه يتم استخدامها مع كل من ناقلة النفط KVLCC2 [3]، وناقلة الصب JBC [4].

هناك الكثير من الدراسات التي تتم على الدفات البحرية بهدف دراسة وتحليل حقل التدفق التي تعمل ضمنه هذه الدفات. أيضاً تعتبر ظاهرة التكهف من أكثر الظواهر الضارة التي تؤثر على الدفات البحرية، ودائماً هناك أبحاث من أجل دراسة هذه الظاهرة والعمل على تقليلها. لدراسة مثل هذه الظواهر لابد من إجراء اختبارات تجريبية لنماذج حقيقة مصغرة لكل من الرفاص والدفة في أحواض اختبارات النماذج أو قنوات مائية متطورة تحتوي على أجهزة حديثة قادرة على تصوير حقل الجريان والتأثيرات المختلفة بين الرفاص والدفة ولكن مع ازدياد تكلفة هذه الأجهزة والزمن اللازم لتنفيذ التجربة ومحدودية قنوات الاختبار أصبح الأمر صعباً نوعاً ما، وبالأخص في حال وجود السفينة مع ملحقاتها، حيث يصبح الأمر صعباً للغاية على أجهزة القياس لأن أبعاد السفينة كبيرة جداً بالنسبة لأبعاد ملحقاتها. لذلك يتم حالياً التوجه إلى دراسة الجريان رقمياً باستخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD, Computational Fluid Dynamics)، الذي يعتبر إحدى فروع ميكانيك الموائع التي تستخدم الطرق العددية والخوارزميات لحل المسائل التي تتضمن جريان الموائع، وتحليل نتائج المحاكاة.

تم في الورقة البحثية Shen et al., 1997 [5] إجراء دراسة تجريبية لدراسة تأثيرات بدن السفينة والرفاص على تكهف الدفة. تم إجراء التجربة في قنوات خاصة باختبارات التكهف تابعة للبحرية الأمريكية. تم في هذا البحث دراسة وتحليل التأثير المتبادل بين الدفة والرفاص، وكما تم قياس زوايا تدفق تيار الرفاص المنزلق المتجه نحو الدفة بهدف دراسة تأثيرها على التكهف المؤثر على الدفة. القياسات تمت باستخدام نظام Laser Doppler Velocimetry, LDV.

قام Simonsen في عام 2000 بدراسة التأثير المتبادل بين الدفة والسفينة في جملة (السفينة - الرفاص - الدفة) على أداء المناورة لناقلة نفط (Esso Osaka Tanker)، وقام بإجراء تجارب على هذا النموذج. قام الباحث بدراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص، وبين البدن والدفة كل على حدى. كما تم اختبار الدفة بشكل مستقل في التدفق الحر. بالإضافة إلى الدراسات التجريبية قام الباحث بإجراء دراسة رقمية للحالات السابقة وأجرى عملية التحقق والتحقق (Verification and Validation, V&V) للنتائج للتأكد من صحتها. اتبع الباحث المنهج المقترح من قبل Stern, Coleman, Wilson and Paterson 1999 من أجل إجراء حسابات التحقق والتحقيق، [6]. تم حساب القوى والعزم المؤثرة على كل من الدفة والرفاص والنموذج، كما تم قياس حقول السرعة والضغط، بالإضافة لدراسة تأثير تغيير زاوية الدفة على القوى والضغط المؤثرة عليها [7].

قام Paik et al., 2012 [8] وزملاؤه بدراسة التكيف المتشكل على الدفة بفعل التدفق القادم من الرفاص. لقد تم استخدام رفاص ذو 6 شفرات ودفة نصف متوازنة. تم إجراء التجربة في قناة خاصة بإجراء اختبارات التكيف، وتم قياس حقول السرعة في مستويات أفقية بين الدفة والرفاص وعمودية على الدفة. تم تغيير زاوية الهجوم للدفة (Angle-Of-Attack, AoA) أثناء التجربة بهدف دراسة تأثيرها على التكيف، وتم التوصل إلى أن الزاوية 7 درجة هي أكثر زاوية ينشأ فيها التكيف ويدوم بشكل ففعال وكبير.

تعتبر دراسة Gim في عام 2013 [1] من أهم الدراسات التي تمت على بروفايل NACA0018 حيث تم في هذه الدراسة إجراء اختبار لزوج من الدفات باستخدام تقنية (PIV) particle image velocimetry في قناة مائية مدورة، تم استخدام الدفات نوع NACA0018 عند رقم رينولدز ثابت لكل التجارب بقيمة  $1.5 \times 10^4$  وبمسافات مختلفة بين الدفتين (0.5C، 0.75C، 1C) (C: طول وتر الجناح) وعند زوايا هجوم مختلفة (10°، 20°، 30°) على التوالي، جميع حقول السرعة المتوسطة وحقول الجريان تم عرضها وتحليلها عند زوايا هجوم مختلفة في حالة دفة واحدة. بينما في الدفات المزدوجة تم تصوير خطوط التيارات اللحظية، حقول السرعة المتوسطة بالنسبة للزمن، شدة الاضطراب، والدوامات ومقارنتها مع بعضها البعض لتحديد المسافة الحرجة بين الدفات المفردة. أظهرت النتائج ان المسافة المثلى بين دفتين تلعب دوراً مهماً في زيادة القوة الجانبية المتبادلة بين البدن والدفة والرفاص في الظروف البحرية الصعبة، [1].

Badoe et al., 2015 [9] تم في هذا البحث إجراء دراسة شاملة لتأثير حقل الجريان الناتج عن الرفاص على الدفة في المياه المفتوحة باستخدام الكود المفتوح المصدر OpenFOAM. استخدمت طريقة الـ RANS وموديل الاضطراب  $k - \omega SST$  لحل معادلات نافيه ستوكس، تم حساب جميع معاملات الرفع والسحب للدفة والرفاص عند زوايا مختلفة للدفة، كذلك معاملات العزم والدفع للرفاص تم حسابها وعرضها عند زوايا مختلفة للدفة. مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة أظهرت تطابقاً جيداً بين النتائج.

Karim et al., 2018 [10] تم في هذا العمل دراسة التدفق حول كل من الجناحين الرافعين NACA0012 وNACA0021 باستخدام برنامج الـ Ansys-Fluent. تم استخدام طريقة الـ RANS وموديل الاضطراب  $k - \varepsilon$  لإغلاق نظام المعادلات. تم في الجزء الأول من هذا العمل دراسة التدفق حول الجناح الرافع كما تم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة. في الجزء الثاني من الدراسة تم دراسة وتحليل حقل التكيف المتشكل حول الجناح الرافع عند عدة قيم لرقم التكيف، كما تم دراسة تأثير زاوية الانحراف على حقل التكيف المتشكل.

Hasanvand et al., 2019 [11] تم في هذه الورقة البحثية استخدام خمسة أنواع للدفة (NACA0012, 0025, IFS, Fish tail, HSVA)، لدراسة تأثير كل منها على خصائص الدوران لسفينة حاويات KCS، تم استخدام

برنامج الـ STAR-CCM+ لإجراء الحسابات الرقمية. أوضحت النتائج بأن استخدام الدفات المخصصة بالتحديد للتطبيقات البحرية (IFS, Fish tail, HSVA) تعطي أداء أفضل في المناورة من استخدام الدفات التقليدية (NACA 0012, 0025).

استخدم Paik et al., 2022 [12] وزملائه في هذا العمل نظام 3-D LDV المنظور من أجل قياس التدفق حول الدفة، تم إجراء التجربة في قناة تكهف كبيرة (cavitation tunnel (LCT) in KRISO). تم إجراء الدراسة عند أرقام رينولدز كبيرة نسبياً وتتراوح بين  $10^7 - 10^8$ ، تم دراسة التأثير المتبادل بين الدفة والرفاص عند هذه القيم. تم إجراء حسابات رقمية لنفس الحالات التي تم دراستها تجريبياً، والنتائج حققت توافقاً جيداً مع بعضها البعض. النتيجة الأهم في هذه الدراسة أنه تم دراسة حقل التدفق بشكل تفصيلي حول الدفة عند زوايا انحراف مختلفة للدفة، ومن خلال النتائج التي تم التوصل إليها تبين بأن التكهف يكون أكثر احتمالية في المنطقة  $0.5 < Z/Span < 0.9$ ، وعليه تم تعديل شكل الدفة في هذه المنطقة وبالفعل من خلال إعادة التجربة مع الشكل الجديد من الدفة، أثبت هؤلاء الباحثون أن هذا التغيير يحسن من قدرة الدفة على مقاومة تشكل التكهف.

Van Stratan et al., 2023 [13] قاموا بتحسين شكل الدفة ذات مقطع NACA0018 عند القيم المنخفضة لرقم رينولدز. تم استخدام برنامج ANSYS Fluent من أجل إتمام هذه الدراسة. تم تعريف نسبة الرفع إلى السحب على أنها البارامتر الأساسي لعملية التحسين. تم تحسين هذه النسبة في النموذج المطور بمقدار 20%. أظهر النموذج المُحسن زيادة كبيرة في نسبة الرفع والسحب من القيمة الأساسية الأولية NACA0018.

من خلال ما تقدم يمكننا توضيح الاختلاف في هذه الدراسة عن الدراسات المرجعية:

- لا يوجد أية دراسة مرجعية تخص التكهف حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2 التي سنقوم بإجراء الدراسة عليها.
- دراسة Van Stratan et al., 2023 [13] والتي تمت على دفة ذات مقطع NACA0018 كان الهدف منها تحسين شكل الدفة بالشكل الذي يحسن من قوة الرفع ولم تتطرق أبداً إلى دراسة التكهف حول هذه الدفة.

### أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- دراسة تفصيلية ودقيقة لحقل التدفق (السرعة والضغط) حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2 ذات مقطع NACA0018 مع زوايا انحراف مختلفة.
- دراسة ظاهرة التكهف المتشكلة حول هذه الدفة والظروف المؤدية إلى هذه الظاهرة.
- دراسة تأثير زاوية هجوم الدفة (Angle-Of-Attack, AoA) ورقم فرود على التكهف المتشكل على الدفة.

### طرائق البحث ومواده:

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

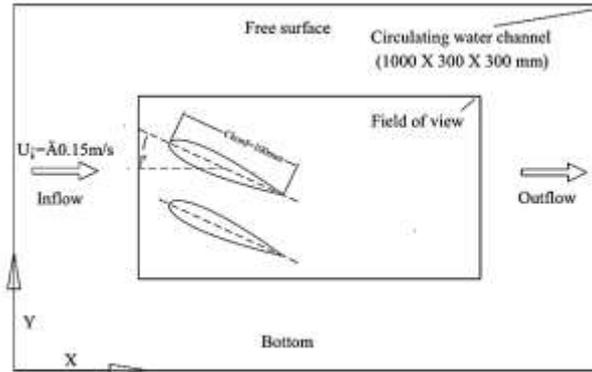
### مواد البحث

- يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:
- النموذج الهندسي لدفة السفينة الناقلة KVLCC2.

- تقنية الـ CFD والذي يوفرها الكثير من البرامج حالياً.
- برنامج الـ ANSYS.

#### الأبعاد الهندسية

في الجزء الأول من هذه الدراسة تم استخدام دفة NACA 0018 بالأبعاد الموضحة في الدراسة [1]، حيث تم في هذه الدراسة اختبار دفة NACA 0018 ذات وتر بطول 100 ملم، وامتداد للجناح بمقدار 150 ملم. الشكل 1 يوضح جناح NACA 0018 ضمن قناة الاختبار، بالإضافة لأبعاد القناة.

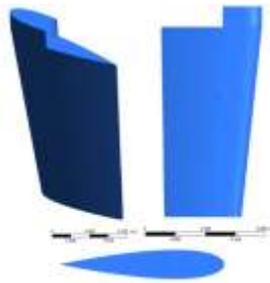


الشكل 1: الجناح NACA 0018 والقناة التي تم فيها إجراء التجربة [1].

في هذا الجزء من الدراسة تم إجراء الحسابات على كل الحالات التي تمت في دراسة Gim 2013 [1]. عدد الحالات التي تم حسابها في هذا الجزء من الدراسة هي 13 حالة وهي كالتالي:

- تم دراسة الجناح الرافع لوحده مع أربع زوايا انحراف وهي 10-15-20-25 درجة، هذه أول أربع حالات.
- جناحين رافعين فوق بعضهما البعض مع مسافة بينهما قدرها 0.5 من طول الوتر، كما هو موضح في الشكل 1 على اليسار، وهنا تم دراسة 3 زوايا انحراف وهي 10-20-30 درجة.
- جناحين رافعين فوق بعضهما البعض مع مسافة بينهما قدرها 0.75 من طول الوتر، وهنا أيضاً تم دراسة 3 زوايا انحراف وهي 10-20-30 درجة.
- جناحين رافعين فوق بعضهما البعض مع مسافة بينهما قدرها 1.0 من طول الوتر، وهنا أيضاً تم دراسة 3 زوايا انحراف وهي 10-20-30 درجة.

في الجزء الثاني من الدراسة تم استخدام دفة السفينة KVLCC2 الموضحة في الشكل 2، والشكل 3، وهي ذات مقطع NACA 0018 ولكن بوتير متغير القيمة على امتداد ارتفاع الدفة.



الشكل 2: دفة ناقلة النفط KVLCC2 ذات مقطع NACA 0018 [3].

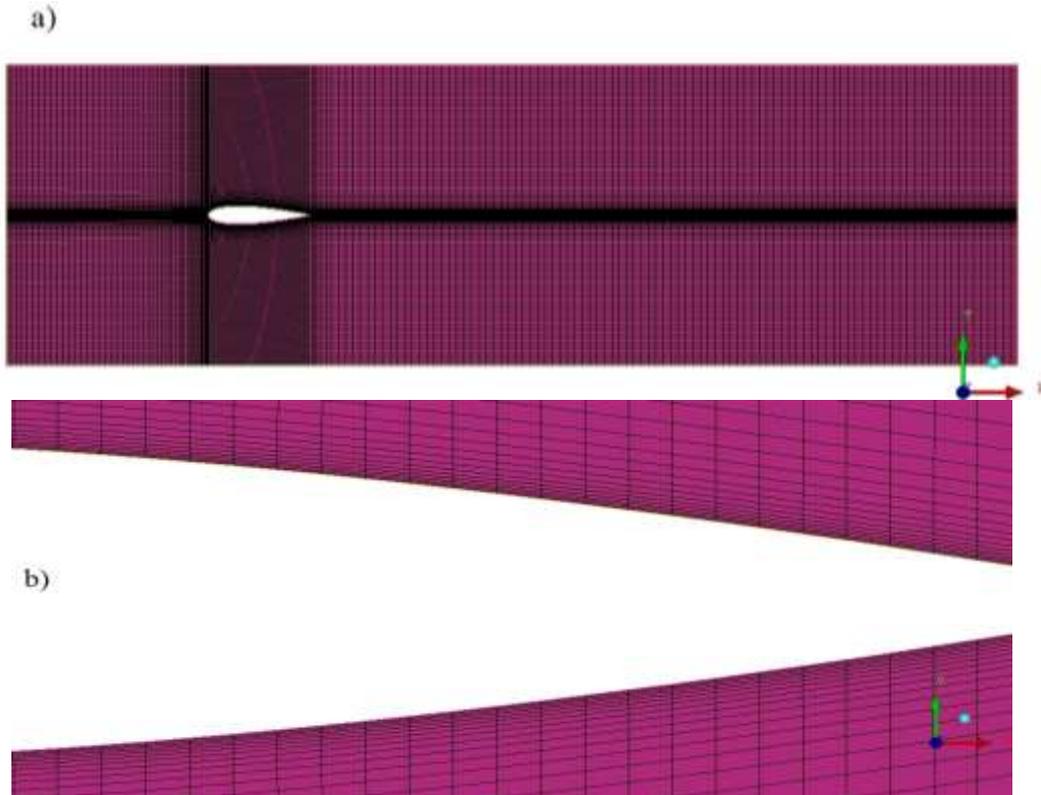


الشكل 3: توضع الدفة خلف نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 [3].

تم دراسة الدفة بمقياس تصغير 1/58 مشابه تماماً لمقياس تصغير النموذج أثناء اختباره في قنوات الجر. الشكل 3 يوضح كيفية توضع الدفة خلف نموذج السفينة الناقلة KVLCC2. وكما هو واضح من هذا الشكل نلاحظ أن ارتفاع أسفل الدفة عن مستوي قاع النموذج هو 3.94 ملم. في هذه الخطوة من الدراسة تم إجراء الحسابات على 16 حالة، حيث تم حساب الدفة مع زوايا الانحراف 0-10-20-30 درجة وذلك عند أربع قيم لرقم فرود وهي (0.09، 0.142، 0.20، 0.55)، مع العلم أن القيمة التي تقابل سرعة الخدمة للسفينة هي  $Fr=0.142$ .

#### الشبكة الرقمية

تم استخدام الشبكات المنتظمة لإجراء هذه الدراسة وذلك على اعتبار أن الشبكات المنتظمة تعطي أفضل النتائج في الحسابات الرقمية، وكما أنها هي الأفضل من ناحية المدة الحسابية، حيث أنها تحتاج إلى وقت أقل لإتمام العمليات الحسابية [14]. الشكل a-4 يعرض مقطع أفقي للشبكة المنتظمة التي تم استخدامها في هذه الدراسة، وكما نلاحظ من الشكل b-4 أنه تم تنعيم الخلايا ضمن منطقة الطبقة الحدية بشكل جيد، وذلك من أجل حل بروفایل السرعة بالشكل الصحيح ضمن منطقة الطبقة الحدية.



الشكل 4: مقطع أفقي للشبكة المنتظمة التي تم استخدامها في الدراسة (a) والتنعيم في منطقة الطبقة الحدية (b).

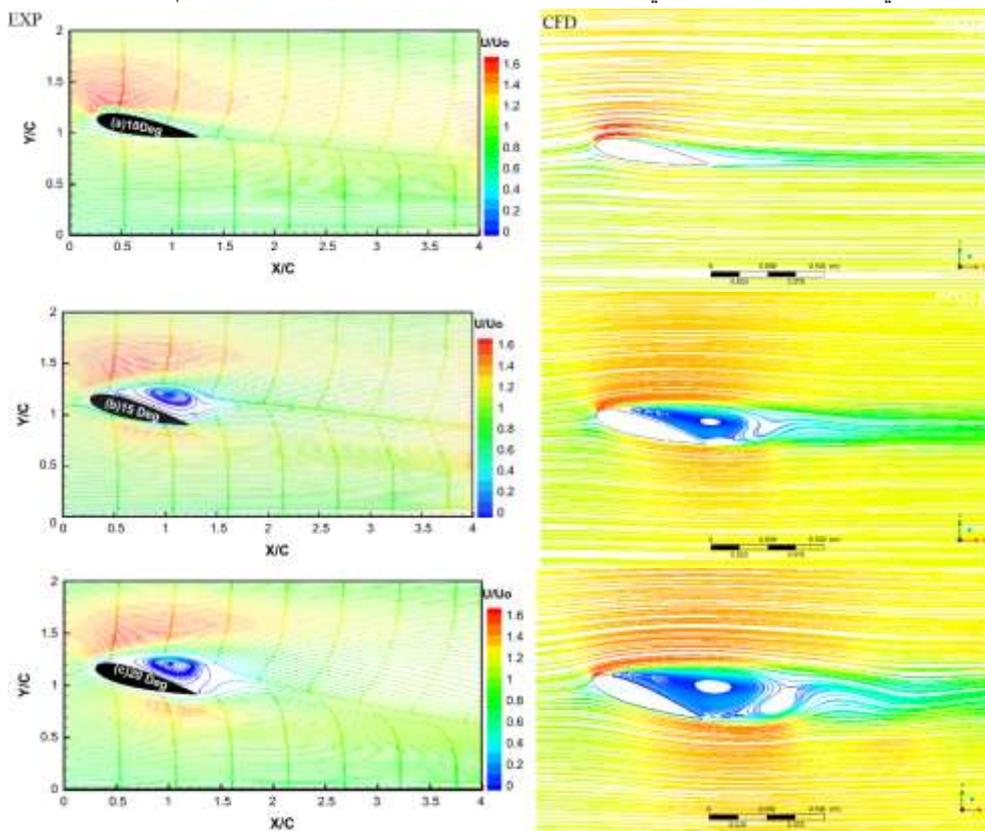
تم استخدام برنامج الـ ICEM من أجل بناء هذه الشبكات. وتم استخدام نفس النوع من الشبكات لكل الحالات المدروسة. عدد الخلايا يتراوح بين الـ 3.5-5 مليون خلية لكل حالة، حيث أنه مع حالات الدراسة التي يوجد فيها جناح NACA 0018 لوحدة كان عدد الخلايا 3.5 مليون خلية، ومع الحالات التي وجد فيها جناحين NACA 0018 بمسافات مختلفة بينهما تم استخدام 4.5 مليون خلية، ومع دفة السفينة تم استخدام 5 مليون خلية.

### النتائج والمناقشة:

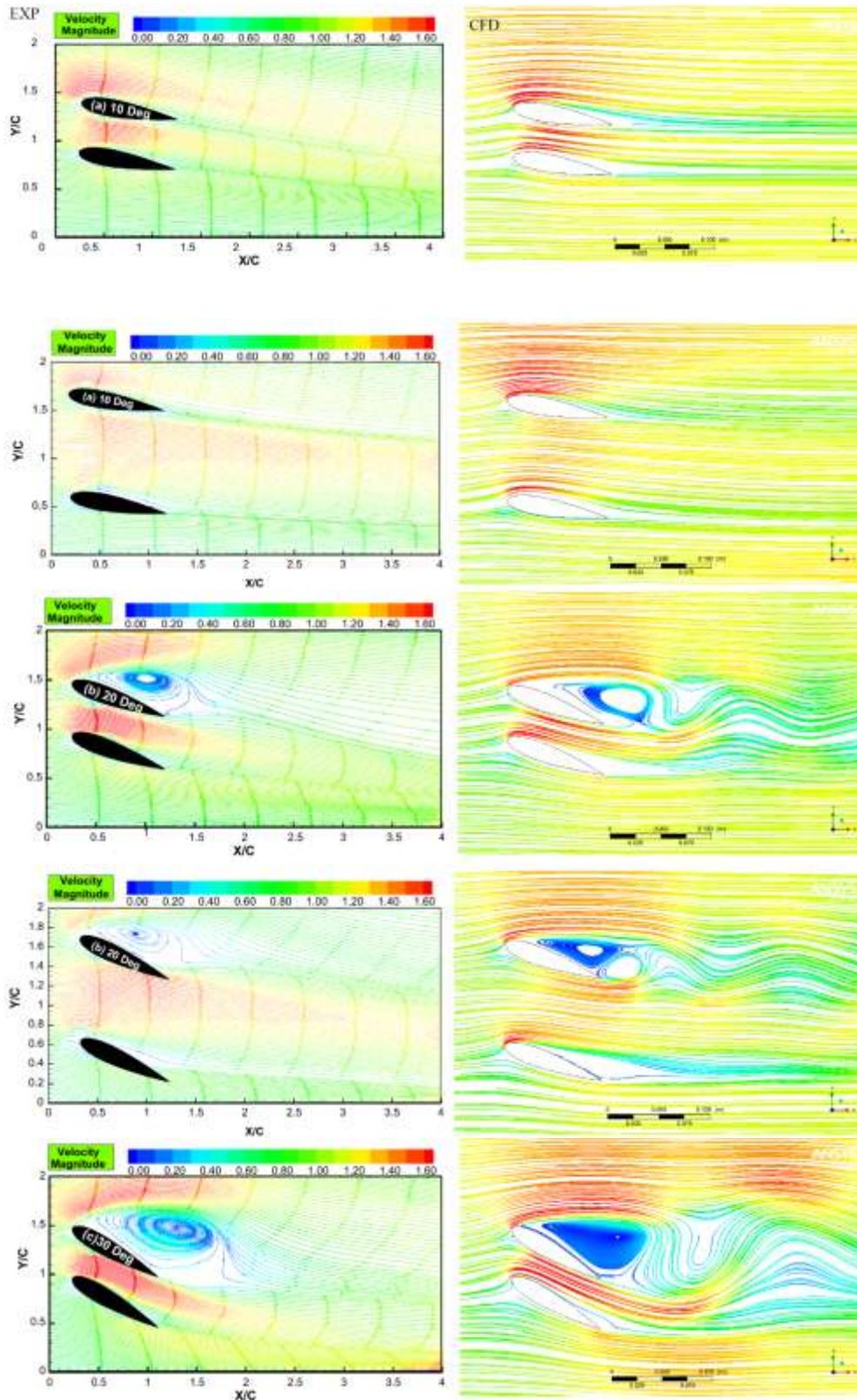
من أجل التحقق من كفاءة الشبكة الرقمية ودقة الإعدادات الرقمية التي تم استخدامها، تم في البداية مقارنة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها لحالة الجناح الرفع NACA 0018 مع النتائج التجريبية المتوفرة ضمن عمل Gim [1] 2013.

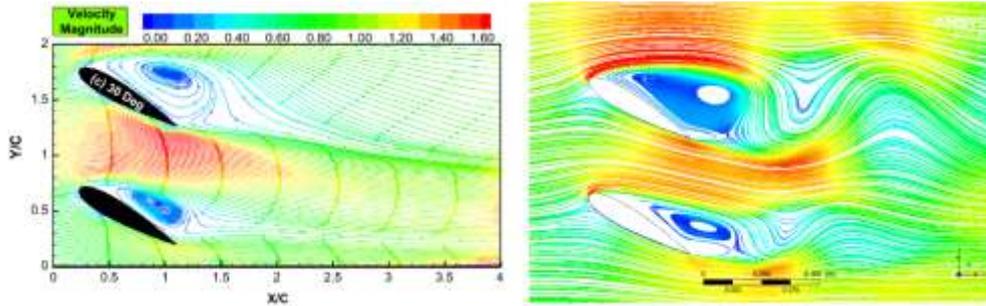
#### تقييم وتحليل حقل السرعة حول جناح NACA 0018 مع زوايا هجوم مختلفة

الشكل 5 يعرض مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لحقل السرعة الوسطية حول جناح NACA 0018 (عدد واحد) مع زوايا هجوم مختلفة. الشكل 6 يعرض أيضاً مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لحقل السرعة الوسطية حول جناحي NACA 0018 والتي يفضل بينهما مسافات مختلفة وعند زوايا هجوم مختلفة.



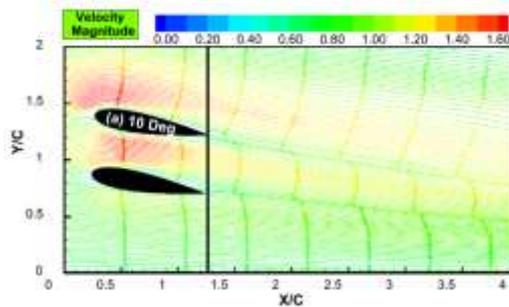
الشكل 5: مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لحقل السرعة الوسطية حول جناح NACA 0018 (عدد واحد) عند زوايا هجوم مختلفة.





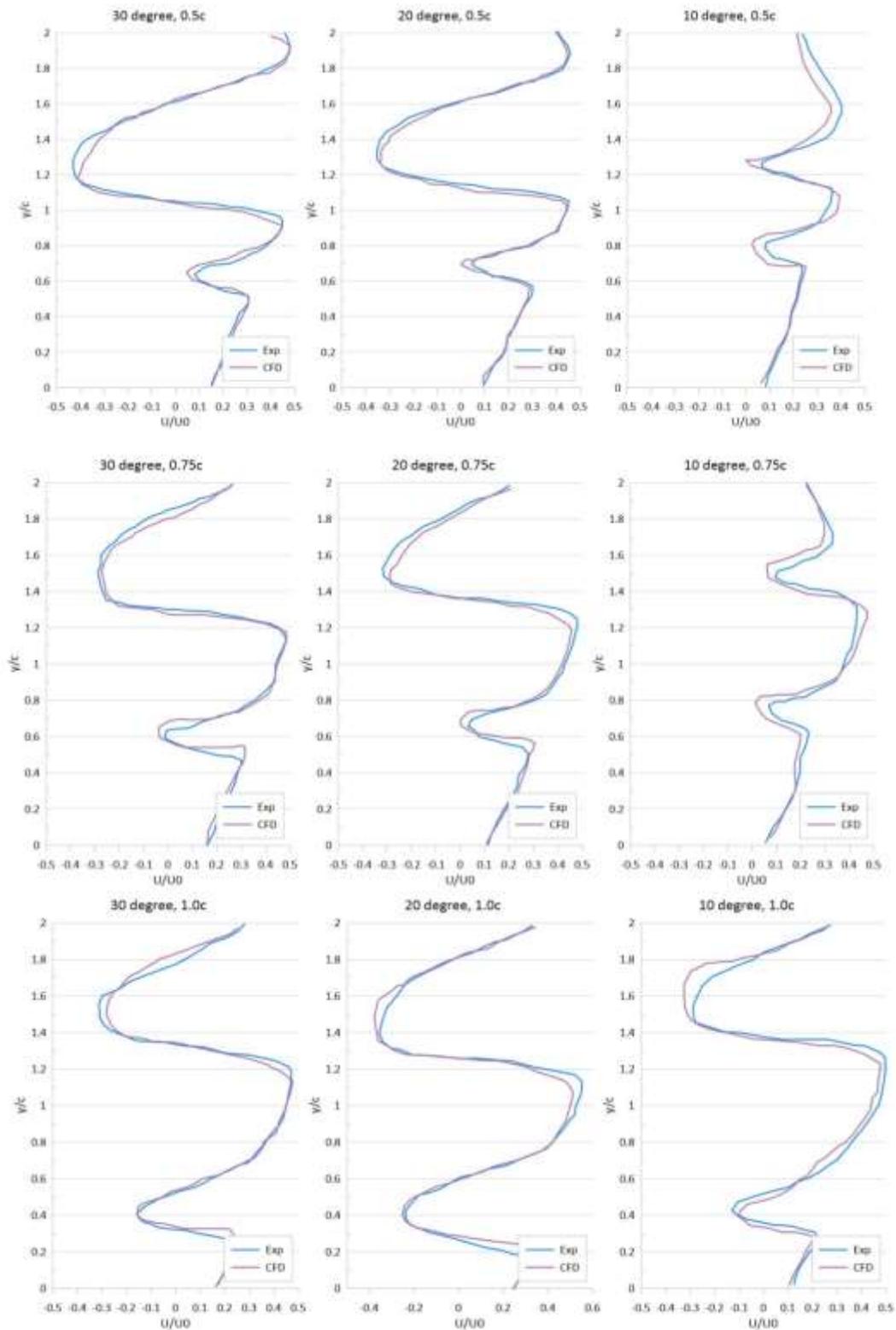
الشكل 6: مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لحقل السرعة الوسطية حول جناحي NACA 0018 عند قيم مختلفة للمسافة بينهما (0.5c, 0.75c, 1.0c) عند زوايا هجوم مختلفة.

يمكننا أن نلاحظ من الأشكال السابقة أن زاوية انحراف الجناح الراجع من 0-10 درجة لا تؤدي إلى تشكل منطقة دوران عكسي خلف الجناح، سواء أكان الجناح لوحده أو يوجد جناح آخر تحته (بغض النظر عن المسافة بينهما)، ومع ازدياد زاوية الانحراف عن الـ 10 درجة تبدأ منطقة الدوران العكسي خلف الجناح بالظهور وتزداد شدتها ومساحتها مع زيادة زاوية الانحراف. في حال وجود جناحين فوق بعضهما البعض فنلاحظ أنه مع ازدياد زاوية الانحراف عن الـ 10 درجة فإن منطقة الدوران العكسي لا تظهر خلف الجناح المتوضع في الأسفل إلا إذا كانت المسافة بين الجناحين  $\leq$  طول الوتر وزاوية انحراف الجناحين  $\leq$  30 درجة.



الشكل 7: الخط التي تم فيه قياس القيمة الوسطية للسرعة اللابعدية خلف الجناحين.

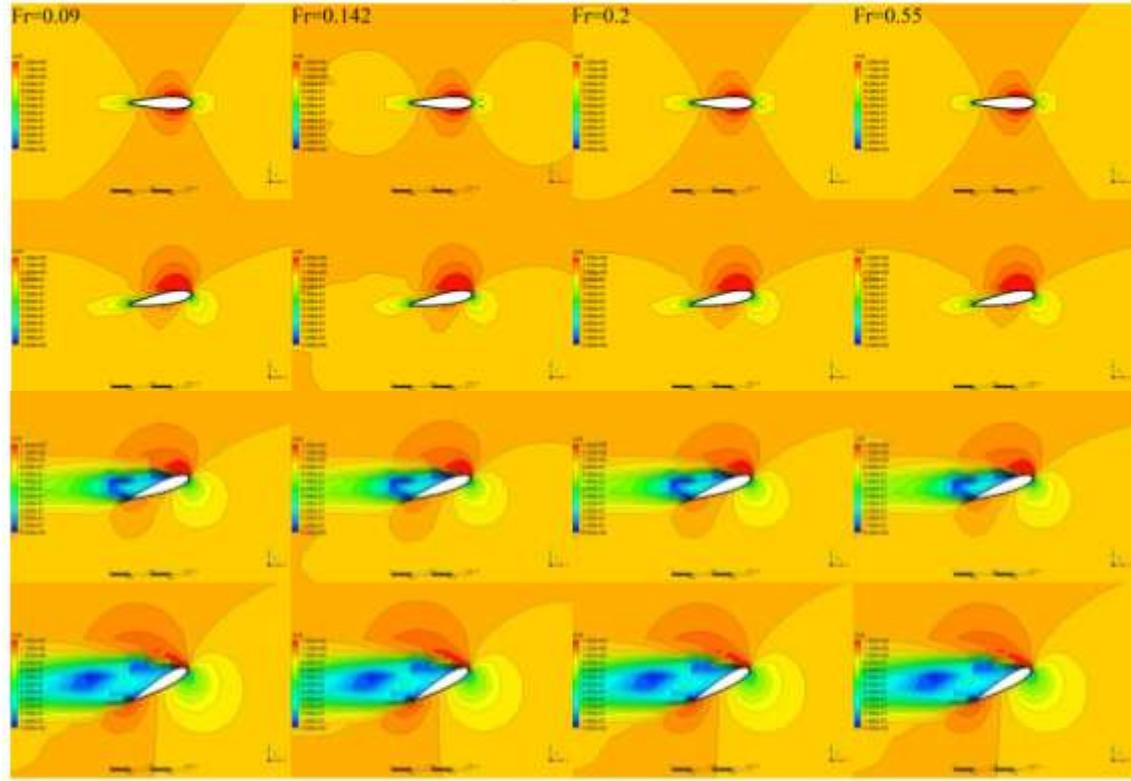
النتيجة السابقة لحقل السرعة بين الجناحين تم تأكيدها من خلال عرض قيم السرعة اللابعدية (الشكل 8) على طول الخط المتوضع على الامتداد الشاقولي لنهاية الجناحين، الخط موضح في الشكل 7. تم في الشكل 8 مقارنة النتيجة التجريبية مع النتيجة الرقمية والتي حققت توافقاً جيداً. من خلال هذا الشكل نلاحظ أن هناك دائماً زيادة في السرعة بين الجناحين بالمقارنة مع سرعة التدفق الحر (بعيدا عن الجناحين)، كما نلاحظ زيادة مساحة وقوة التدفق العكسي فوق الجناح المتوضع في الأعلى، في حين تقل فوق الجناح المتوضع في الأسفل وهذا ما تم تأكيده سابقاً. من خلال الأشكال السابقة نلاحظ مقدار التطابق الكبير بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية، وهذا الأمر يؤكد مدى دقة الشبكة الرقمية، الإعدادات الرقمية التي تم استخدامها. هذه النتائج تؤكد أن التدفق حول بروفائل NACA 0018 تم حله بشكل صحيح، وبالتالي يمكننا الانتقال إلى الخطوة التالية في هذا العمل وهي دراسة حقل التدفق والتكهف حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2، والتي هي مشابهة تماماً للدفة التي تمت دراستها، الاختلاف الوحيد أن مقطع دفة السفينة ذو وتر متغير القيمة على كامل ارتفاع الدفة.



الشكل 8: مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لقيمة السرعة اللابعدية على امتداد الخط المتوضع خلف الجناحين والموضح في الشكل 7 وذلك من أجل مسافات مختلفة بين الجناحين (0.5c, 0.75c, 1.0c).

### دراسة وتحليل حقل السرعة حول دفة السفينة الناقلية KVLCC2

الأبعاد الهندسية لدفة السفينة تم توضيحها في الشكل 2 والشكل 3. كما ذكر سابقا تم حساب دفة السفينة عند أربع قيم لرقم فرود وهي (0.09، 0.142، 0.2، 0.55) وعند كل قيمة تم الحساب عند أربع قيم لزاوية انحراف الدفة وهي (0، 10، 20، 30) درجة. الشكل 9 يعرض توزيع حقل السرعة حول دفة السفينة في منتصف ارتفاعها، انظر الشكل 10.



الشكل 9: توزيع حقل السرعة الالبعدي حول دفة السفينة KVLCC2 عند قيم مختلفة لرقم فرود وزاوية الانحراف.



الشكل 10: المستوي الذي تم فيه عرض حقل السرعة حول دفة السفينة.

كما هو واضح من الشكل 9 فإن توزيع حقل السرعة حول دفة السفينة مشابه تماماً لتوزيع حقل السرعة حول بروفايل NACA0018 (Gim 2013) الذي تم دراسته في الأعلى، وذلك لأن دفة السفينة الناقلة KVLCC2 لها مقطع NACA0018 ولكن بوتير متغير تبعاً للارتفاع. من هذا الشكل نلاحظ أنه مع زوايا الانحراف الصغيرة  $\geq 10$  درجة، لا تتشكل منطقة دوران عكسي خلف الدفة، ولكن مع زيادة زاوية الانحراف نلاحظ كيف تنشأ هذه المنطقة (المنطقة الزرقاء) خلف الدفة، وتزداد مساحتها بزيادة زاوية الانحراف. كما نلاحظ أيضاً من الشكل 9 كيف أن زيادة رقم فرود لا يؤثر أبداً على توزيع حقل السرعة اللابعدية والذي يملك نفس الشكل في كل حالات رقم فرود الصغيرة  $Fr=0.09$  والكبيرة  $Fr=0.55$ . وعليه وبناءً على هذه النتائج فإنه من المتوقع ألا يؤثر تغيير قيمة رقم فرود على توزيع قيمة معامل الضغط اللابعدي، وهذا ما سنراه في الفقرة التالية.

### دراسة وتحليل حقل الضغط حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2

يحسب معامل الضغط وفقاً للعلاقة التالية [15]:

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2} = \frac{\Delta P}{q} \quad 1$$

حيث أن:

$P$ : الضغط في النقطة المدروسة  $[\frac{N}{m^2}]$ .

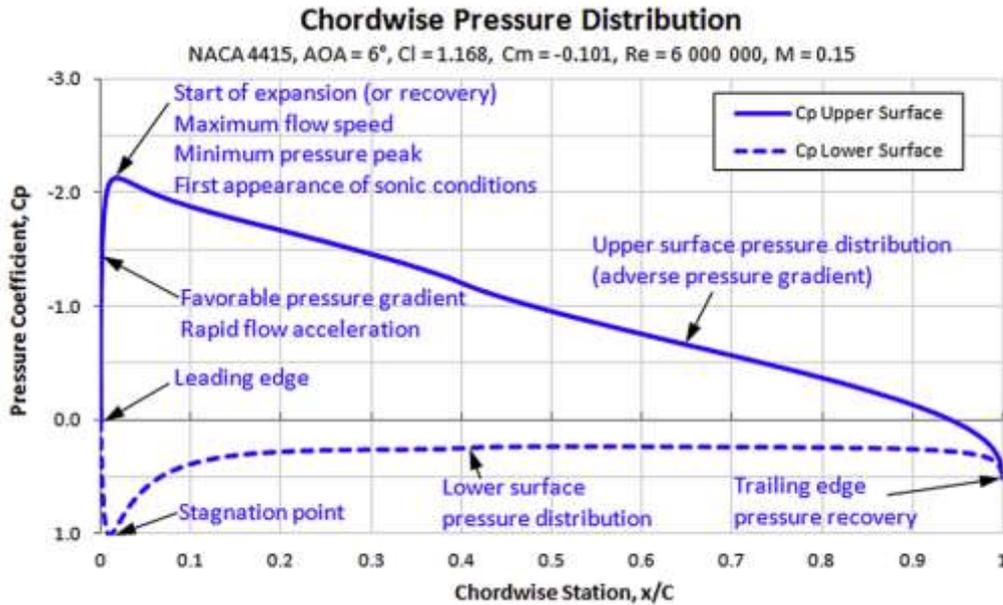
$q$ : الضغط الديناميكي  $[\frac{N}{m^2}]$ .

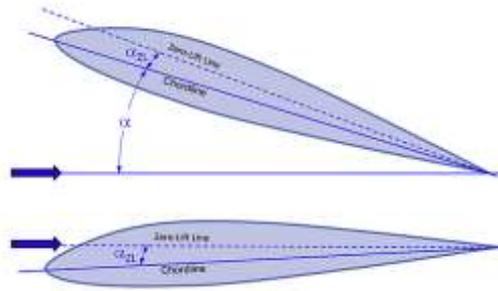
$P_{\infty}$ : ضغط التيار الحر  $[\frac{N}{m^2}]$ .

$V_{\infty}$ : سرعة التدفق الحر  $[\frac{m}{s}]$ .

$\rho_{\infty}$ : كثافة التدفق الحر  $[\frac{Kg}{m^3}]$ .

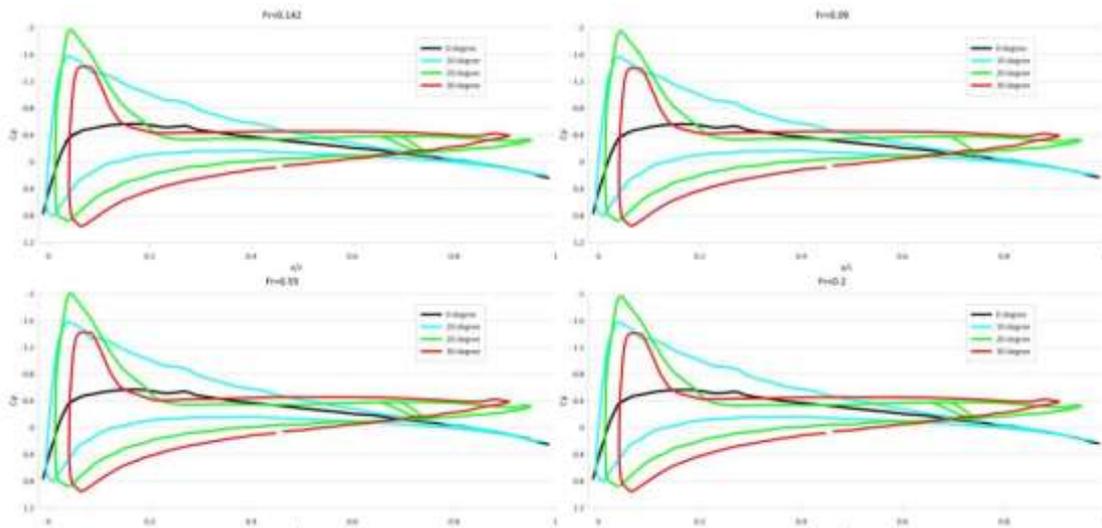
يعرض الشكل 11 التوزيع المثالي لمعامل الضغط حول بروفايل NACA4415 عند زاوية الانحراف 6 درجة ورقم رينولدز  $Re = 6 \times 10^6$  [15].





الشكل 11: التوزيع المثالي لمعامل الضغط حول بروفايل NACA4415 [15].

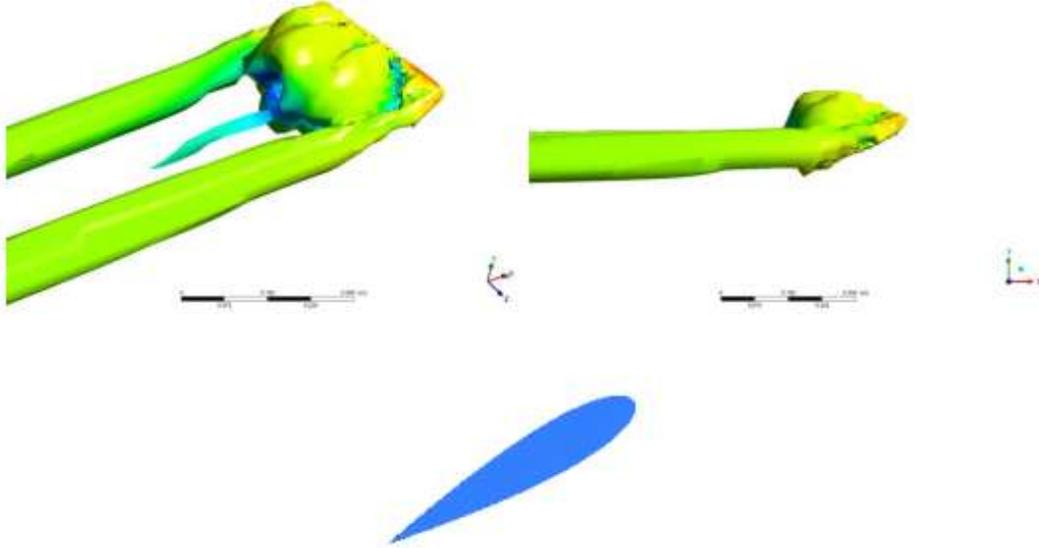
كما هو واضح من الشكل 11 نلاحظ حدوث انخفاض حاد في الضغط على الجهة العليا لحافة الصدم ( Leading edge)، حيث أنه في هذه المنطقة يحدث أكبر زيادة في السرعة وبالتالي ووفقاً لبرنولي سيحدث أكبر انخفاض للضغط، وهذا يكون على الوجه العلوي للجناح الرافع عند حافة الصدم. وعلى العكس من هذا يحدث على الوجه السفلي ازدياد في الضغط بسبب الانخفاض الكبير في السرعة والذي يؤدي إلى تشكل نقطة الركود (Stagnation point). الشكل 12 يعرض توزيع معامل الضغط حول دفة السفينة عند قيم مختلفة لرقم فروود ولزاوية الانحراف. كما هو واضح من هذا الشكل هناك تشابه كبير بين توزيع الضغط في كل الحالات المدروسة (مع زاوية انحراف) مع توزيع الضغط المثالي المبين في الشكل 11، حيث نلاحظ هبوط الضغط عند الجهة العلوية لحافة الصدم وازدياد في الضغط عند الحافة السفلية لجهة الصدم. مع زاوية الانحراف 0 درجة (الخط الأسود) نلاحظ تناظر توزيع الضغط على جانبي الدفة، حيث ينطبق خط الضغط على السطح العلوي للجناح مع خط الضغط على السطح السفلي للجناح.



الشكل 12: توزيع معامل الضغط حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2 عند قيم مختلفة لرقم فروود وقيم مختلفة لزاويا الانحراف للدفة.

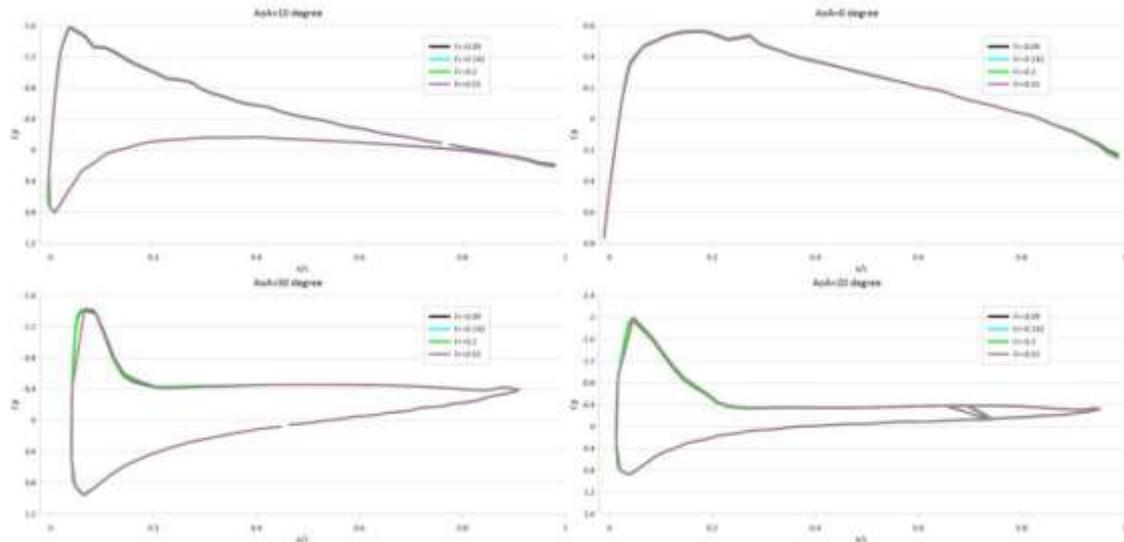
كما نلاحظ من الشكل 12 كيف أن زيادة زاوية الانحراف يؤدي إلى ازدياد القيمة المطلقة للضغط الموجب على الحافة السفلية لحافة الصدم، كما يؤدي إلى ازدياد القيمة المطلقة للضغط السالب على الجهة العلوية لحافة الصدم حتى الزاوية 20 درجة، في حين تعود لنقل القيمة المطلقة للضغط السالب على الجهة العلوية لحافة الصدم مع الزاوية 30 درجة.

السبب الفيزيائي وراء هذا الأمر أن دفات NACA بأغلب أشكالها تزداد فاعليتها مع زيادة زاوية الانحراف حتى الزاوية 22.5 درجة (الزاوية الحرجة)، بعد تجاوز زاوية الهجوم قيمتها الحرجة تزداد قوة المقاومة بمعدلات كبيرة على حساب قوة الرفع التي تتأثر بشدة وتتعرض لتناقص فجائي في قيمتها. في هذه الحالة يحدث تغير ملحوظ في شكل الجريان الحاصل حول مقطع الجناح. يبين الشكل 9 شكل الجريان الحاصل حول مقطع الجناح قبل انفصال الطبقة الحدية (الزاوية 0 و 10 درجة). ومع تجاوز زاوية الانحراف الزاوية الحرجة  $\alpha_{cr}$ ، يتشكل فوق الجناح أثر ذيلي عالي الاضطراب، ويفقد الجناح قوة الرفع المتوفرة من الضغط السالب. تبين الأبحاث أنه عند تجاوز زاوية الهجوم القيمة  $\alpha_{cr}$  ينخفض الضغط على ظهر الجناح بشدة في الأجزاء المتقدمة منه والقريبة من الطرف القائد، ثم يعود الضغط للزيادة حتى يصل إلى قيمة تساوي قيمة ضغط التيار الحر تقريباً عند نهاية ظهر الجناح. لذلك فإن القسم الأخير من ظهر الجناح يتعرض لتدرج موجب في الضغط وهذا ما يوفر الشروط لانفصال الطبقة الحدية عن الجناح. ومع زيادة زاوية الهجوم تزداد شدة التدرج الموجب للضغط وتتوفر الشروط الجيدة للانفصال وتتشكل الأثر الذيلي، والذي ينتج عنه الكثير من الدوامات الضخمة والفعالة. يعرض الشكل 13 الدوامات المتشكلة حول بدن الدفة مع زاوية الانحراف 30 درجة. من هذا الشكل نلاحظ حجم وقوة الدوامات المتشكلة، كما نلاحظ كيف أن الدوامات تغطي كامل السطح العلوي للدفة وهي منطقة الأثر الذيلي الناتج عن انفصال الطبقة الحدية [16].



الشكل 13: الدوامات المتشكلة حول بدن الدفة مع زاوية الانحراف 30 درجة.

يبين الشكل 14 تأثير تغير رقم فرود على توزيع معامل الضغط حول بدن الدفة، كما هو واضح من هذا الشكل فإن زيادة السرعة لا يغير كثيراً من توزيع معامل الضغط حول بدن الدفة. السبب الفيزيائي وراء هذا الأمر أنه كما رأينا من حقل السرعة اللابعدية في الشكل 9 فإن زيادة رقم فرود عند نفس الزاوية لا يغير تقريباً من توزيع السرعة اللابعدية حول بدن الدفة. كما ذكر سابقاً يعطى معامل الضغط بالعلاقة 1، كما يمكن (وفقاً لبرنولي) أن يتم إعادة صياغة هذه العلاقة لتكتب بالشكل التالي [15]:



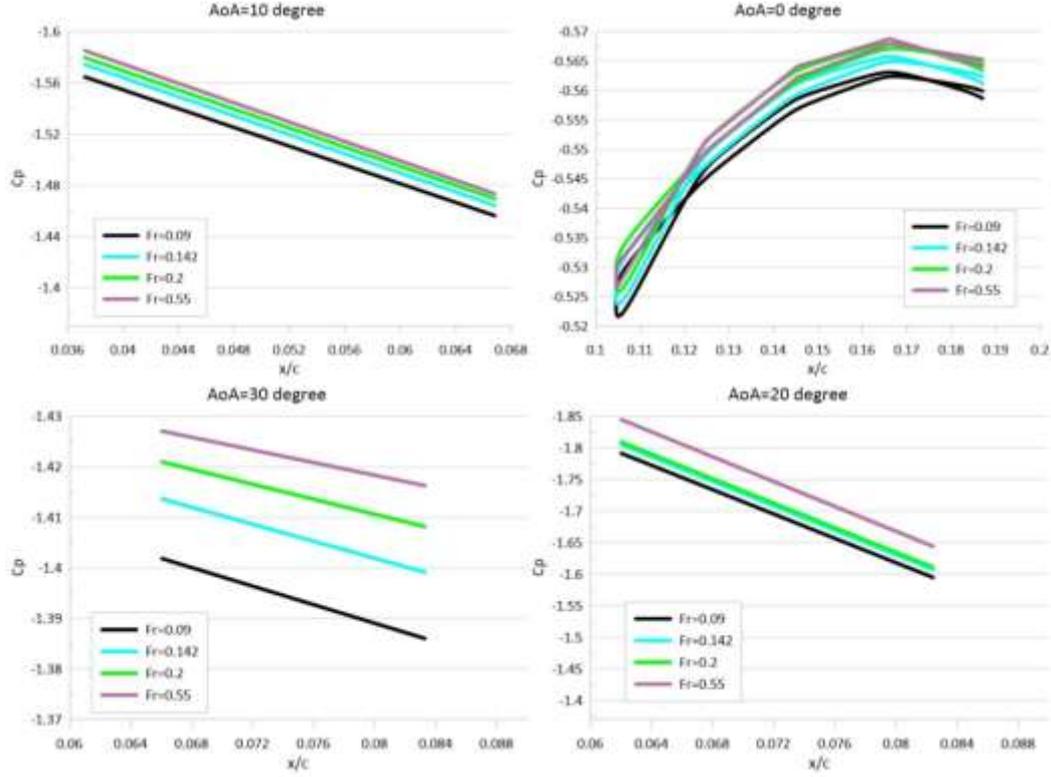
الشكل 14: تأثير رقم فرود (زيادة السرعة) على توزيع الضغط حول الدفة.

$$C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2 \quad 2$$

حيث أن:

$V$ : سرعة التدفق في النقطة المدروسة  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

من المعادلة 2 يمكننا ملاحظة أن معامل الضغط يرتبط بشكل مباشر بقيمة السرعة اللابعدية حول بدن الدفة، وعلى اعتبار (من الشكل 9) أن توزيع السرعة اللابعدية متشابه تماماً مع تغير رقم فرود، فإن توزيع معامل الضغط أيضاً لا يتغير تقريباً مع تغير رقم فرود. التغير الوحيد الذي يمكن ملاحظته هو الفرق البسيط جداً في منطقة القمة السالبة للضغط والتي تزداد قيمتها مع زيادة رقم فرود، وهذا موضح في الشكل 15.



الشكل 15: تأثير زيادة رقم فرود على القيمة السالبة لمعامل الضغط.

## دراسة وتحليل التكهف حول دفة السفينة الناقلة KVLCC2 وتأثير زاوية انحراف الدفة عليه

يُعرف التكهف على أنه غليان الماء الجاري حول مقطع الجناح الرافع والذي يحدث بفعل ازدياد سرعة الجريان (الضغط الديناميكي)، مما يسبب في هبوط الضغط السكوني إلى ما دون ضغط البخار المشبع اللازم لغليان الماء عند درجة الحرارة المحددة. عند انخفاض الضغط حتى قيمة ضغط تشكل الأبخرة يبدأ الماء بالغليان ويتشكل في مكان تواجد حبات مملوءة بأبخرة من الماء [16]، وهكذا فإن شرط حدوث التكهف هو:

$$P = P_{\infty} - \frac{\rho}{2} \cdot (V^2 - V_{\infty}^2) \leq P_d \quad 3$$

حيث يُمثل  $P_d$  ضغط تشكل البخار المشبع  $\left[\frac{N}{m^2}\right]$  عند درجة حرارة محددة. وبعد إجراء التعديلات الرياضية المناسبة فإن الشرط السابق يأخذ الشكل الآتي:

$$\frac{P_{\infty} - P_d}{\frac{\rho}{2} \cdot V_{\infty}^2} \leq \left(\frac{V}{V_{\infty}}\right)^2 - 1 \quad 4$$

يُدعى الحد الأيسر من المعادلة الأخيرة برقم التكهف ويرمز له بـ  $\sigma$ ، يُدعى الحد الأيمن من المعادلة الأخيرة بمعامل التخلخل ويرمز له بـ  $\zeta$ ، وبالتالي يصبح شرط حدوث التكهف كالتالي:

$$\sigma \leq \zeta \quad 5$$

وكما نلاحظ من المعادلة 4 وبمقارنتها مع المعادلة 2 فإن:

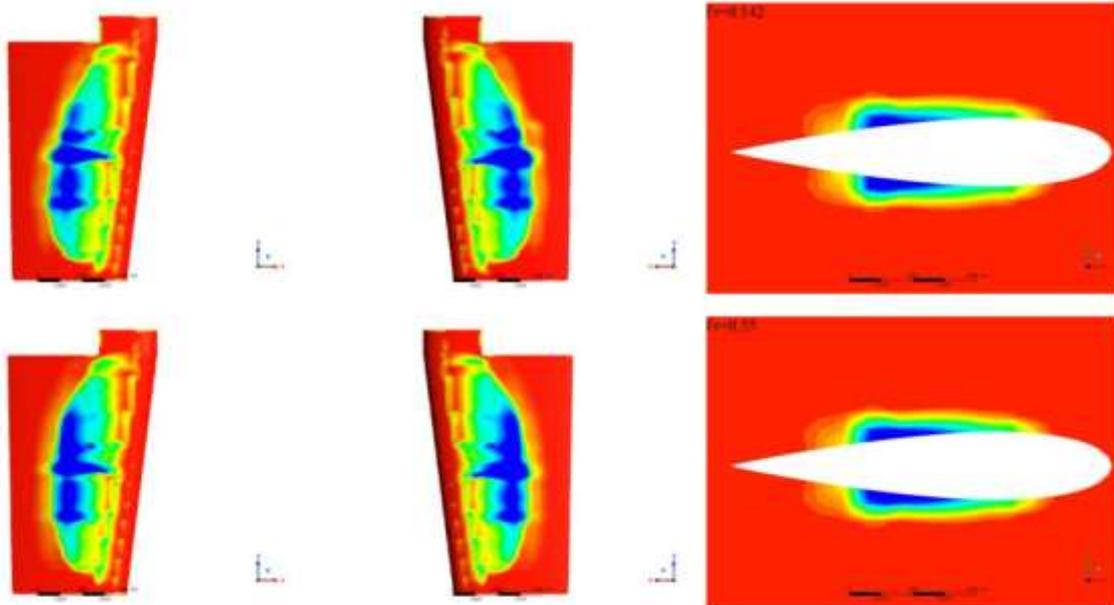
$$\zeta = -C_p \quad 6$$

وعليه يمكن إعادة صياغة المعادلة 5 لتصبح بالشكل التالي:

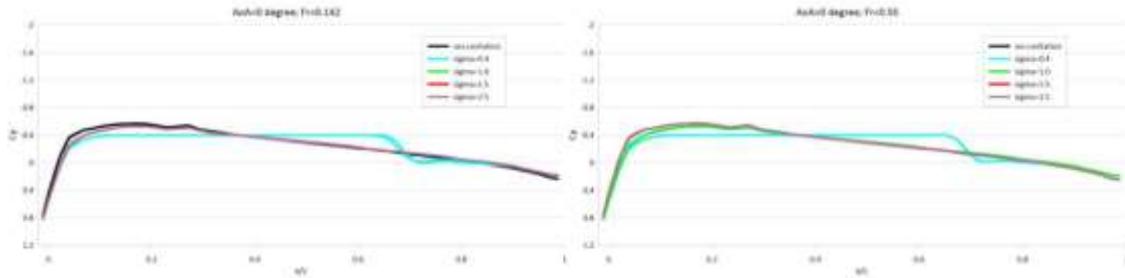
$$\sigma \leq -C_p \quad 7$$

إن رقم التكهف  $\sigma$  يتعلق بعمق غاطس المقطع  $h_s$ ، وبدرجة حرارة الماء وأيضاً بالسرعة  $V_\infty$ . فكلما ازدادت السرعة  $V_\infty$ ، وارتفعت درجة حرارة الماء، وتناقص غاطس المقطع، انخفض رقم التكهف وبالتالي ازداد احتمال حدوث التكهف. يتعلق معامل التخلخل حصراً بنسبة السرعات  $\frac{V}{V_\infty}$  وبالتالي يتعلق بشكل المقطع وزاوية الهجوم. يحدث التكهف أولاً (أي بصورة مبكرة) في النقاط التي تتمتع بسرعات عالية، حيث يكون معامل التخلخل أكبر ما يمكن (وهي نفس النقاط التي يكون فيها معامل الضغط أصغر ما يمكن) [16].

إن رقم التكهف الذي يعبر عن قيمة معامل التخلخل الحدية القادرة على إحداث ظاهرة التكهف في شروط العمل الجارية، أي الرقم الذي يعبر عن قيمة معامل التخلخل المطلوبة لبدء ظهور التكهف يُسمى رقم التكهف الحدي  $\sigma_c$ . مما سبق وبالعودة إلى نتائج الحالات التي تمت دراستها يمكن القول بأن القيمة الحدية لرقم التكهف تختلف مع اختلاف زاوية الانحراف وتكون مساوية للقيمة المطلقة لأصغر قيمة لمعامل الضغط. بالعودة إلى الشكل 12 نلاحظ أن شرط حدوث التكهف مع زاوية الانحراف 0 درجة هو أن يكون  $\sigma \leq 0.5$  ولهذا السبب تم أخذ عدة قيم لرقم التكهف مع الزاوية 0 درجة وهي (0.4، 1.0، 1.5، 2.5)، ومع زوايا الانحراف الأخرى فإن رقمية رقم التكهف الحدي تتراوح ضمن المجال  $1.2 \leq \sigma_c \leq 2$ ، وعليه تم أخذ ثلاث قيم لرقم التكهف وهي (1.0، 1.5، 2.5) مع زوايا الانحراف 10، 20 درجة. يعرض الشكل 16 التكهف المتشكل على جانبي دفة السفينة بدون زاوية انحراف (اللون الأحمر ماء، واللون الأزرق هو بخار الماء) عند رقم التكهف 0.4. كما نلاحظ من هذا الشكل فإن التكهف يغطي جانبي الدفة بشكل متناظر ويتركز بشكل أساسي بعد منتصف الدفة. وجود التكهف سيؤثر حتماً على توزيع الضغط على جانبي الدفة وهذا موضح في الشكل 17. نلاحظ من هذا الشكل التناظر في توزيع الضغط على جانبي الدفة مع وبدون التكهف وهذا أمر متوقع بسبب تناظر الجريان على جانبي الدفة.



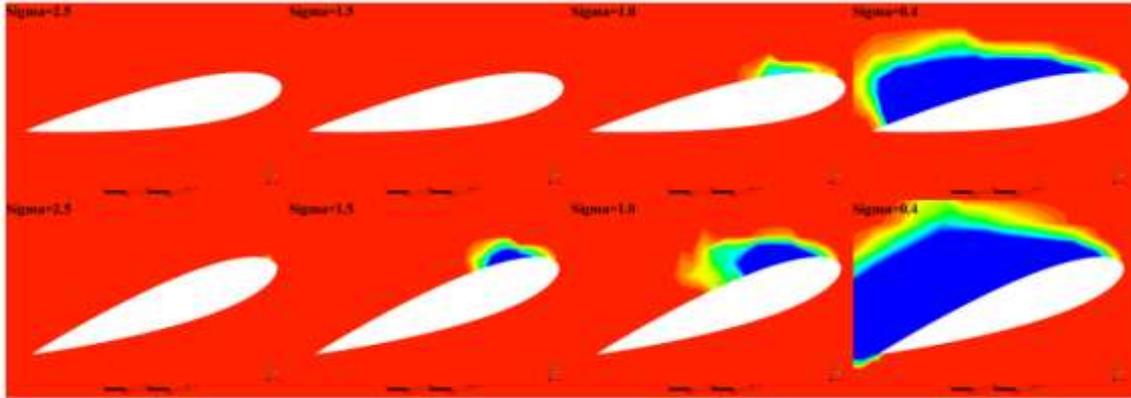
الشكل 16: التكهف على جانبي الدفة مع الزاوية 0 درجة ورقم التكهف 0.4 وعند قيمتين لفردود (0.142، 0.55).



الشكل 17: توزيع معامل الضغط على جانبي الدفة بدون زاوية انحراف مع وبدون تكهف (عند عدة قيم لرقم التكهف).

من الشكل 17 يمكننا أن نلاحظ مع أرقام التكهف الأكبر من 0.4 لا يتشكل تكهف أبداً ويكون توزيع الضغط مشابه تماماً لتوزيع الضغط حول الدفة بدون تكهف. كما نلاحظ من الشكلين السابقين كيف أن تغير رقم فرود لا يؤثر على طبيعة التكهف المتشكل حول الدفة وهذا الأمر متوقع لأن تغيير رقم فرود لم يؤثر على توزيع الضغط على جانبي الدفة (الشكل 14)، وعلى اعتبار أن القيمة الحدية لرقم التكهف تساوي أصغر قيمة لمعامل الضغط والتي تكون متساوية مع تغير رقم فرود، وبالتالي لن يؤثر رقم فرود على طبيعة التكهف المتشكلة حول بدن الدفة.

الشكل 18 يعرض تشكل التكهف حول دفة السفينة عند عدة قيم لرقم التكهف وعند زاويتي الانحراف 10 و 20 درجة. كما هو واضح من هذا الشكل فإن زيادة زاوية الانحراف يؤدي إلى زيادة احتمال نشوء التكهف حتى مع القيم الكبيرة لرقم التكهف.



الشكل 18: التكهف على جانبي الدفة مع زاويتي الانحراف 10، 20 درجة وعند عدة قيم لمعامل التكهف (2.5، 1.5، 1.0، 0.4).

وكما في حالة الدفة بدون انحراف فإن نشوء التكهف يؤدي إلى تغير توزيع الضغط حول بدن الدفة، ودائماً تكون القيمة المطلقة لأقل قيمة لمعامل الضغط تساوي قيمة رقم التكهف الحدي التي تم الحساب عندها. أيضاً مع زاوية الانحراف فإن رقم فرود ليس له تأثير على توزيع حقل الضغط حول بدن الدفة مع وبدون وجود التكهف وهذا الأمر موضح في الشكل 19.

## الاستنتاجات والتوصيات

### الاستنتاجات

- حساب معامل الضغط على محيط الدفة يساعدنا في التنبؤ في الأماكن التي سيحدث فيها التكهف تبعاً لقيمة رقم التكهف الحدية.

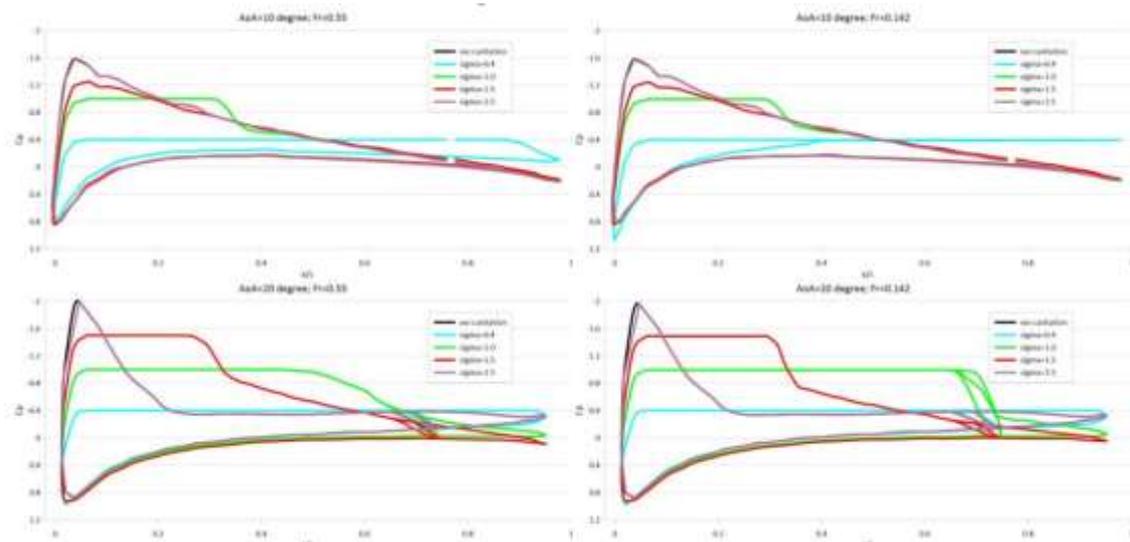
- زيادة زاوية انحراف الدفة يؤدي إلى زيادة احتمال حدوث التكهف حتى مع أرقام التكهف الحدية.
- زيادة السرعة لا تؤثر كثيراً على توزيع معامل الضغط حول بدن الدفة مع وبدون زوايا انحراف.

#### التوصيات

- دراسة التدفق والتكهف حول بدن الدفة أمر غاية في الأهمية في المراحل الأولى من تصميم الدفة وذلك من أجل معرفة فعالية هذه الدفة عند قيم مختلفة لسرعة التدفق، ومن أجل معرفة الأماكن التي من الممكن أن يحدث فيها التكهف.

#### التوصيات للأعمال المستقبلية

- أن يتم دراسة التدفق والتكهف حول الدفة الموجودة خلف بدن السفينة وبوجود الرصاص العامل.



الشكل 19: توزيع معامل الضغط على جانبي الدفة مع زاوية انحراف مع وبدون تكهف (عند عدة قيم لرقم التكهف).

#### References:

- [1] O. S. Gim, "Assessment of flow characteristics around twin rudder with various gaps using PIV analysis in uniform flow," *Ocean Eng.*, vol. 66, 2013, doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.03.018.
- [2] J. S. Carlton, "Marine Propellers and Propulsion," *Mar. Propellers Propuls.*, 2007, doi: 10.1016/B978-0-7506-8150-6.X5000-1.
- [3] Simman 2008, "MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology." Accessed: 26-Jun-2021. [Online]. Available: [http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2\\_geometry.html](http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html).
- [4] Tokyo-2015, "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics." Accessed: 28-Jun-2023. [Online]. Available: <https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html>.
- [5] Y. T. Shen, K. D. Remmers, and C. W. Jiang, "Effects of ship hull and propeller on rudder cavitation," *J. Sh. Res.*, vol. 41, no. 3, 1997, doi: 10.5957/jsr.1997.41.3.172.
- [6] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Verification and validation of CFD simulations," *Proc. 1999 3rd ASME/JSME Jt. Fluids Eng. Conf. FEDSM'99, San Fr. California, USA, 18-23 July 1999*, 1999.
- [7] C. Simonsen, "PhD Thesis: Rudder, propeller and hull interaction by RANS," Technical University of Denmark, 2000.

- [8] B. G. Paik, G. Do Kim, K. S. Kim, K. Y. Kim, and S. B. Suh, "Measurements of the rudder inflow affecting the rudder cavitation," *Ocean Eng.*, vol. 48, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.03.005.
- [9] C. E. Badoe, A. B. Phillips, and S. R. Turnock, "Influence of drift angle on the computation of hull-propeller-rudder interaction," *Ocean Eng.*, vol. 103, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.059.
- [10] M. M. Karim, M. Rahman, M. A. Hai, M. M. Shimul, and S. H. Sudhi, "Numerical investigation of flow around cavitating hydrofoil using finite volume method," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1980, no. 1, Jul. 2018, doi: 10.1063/1.5044328/887271.
- [11] A. Hasanvand, A. Hajivand, and N. Ale ali, "Investigating the effect of rudder profile on 6DOF ship turning performance," *Appl. Ocean Res.*, vol. 92, 2019, doi: 10.1016/j.apor.2019.101918.
- [12] B. G. Paik, S. W. Jeong, Y. H. Park, J. W. Ahn, I. Park, and J. Kim, "Improvement of Rudder Cavitation Performance Using Rudder Inflow Measurements in Large Cavitation Tunnel," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, 2022, doi: 10.3390/jmse10020266.
- [13] G. S. M. van Stratan, S. Roy, and Y. K. San, "Aerodynamic Shape Optimization of a NACA0018 Airfoil Using Adjoint Method and Gradient-Based Optimizer," *MATEC Web Conf.*, vol. 377, p. 1016, 2023, doi: 10.1051/MATECCONF/202337701016.
- [14] N. Abbas and N. Al-Aji, "The Influence of Drift Angle on the Flow Field around KVLCC2 Tanker Using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 1, 2022.
- [15] S. Gudmundsson, "General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures," *Gen. Aviat. Aircr. Des. Appl. Methods Proced.*, pp. 1–1034, 2013, doi: 10.1016/C2011-0-06824-2.
- [16] M. Barbahan, *Ships Hydrodynamic /2/*. Directorate of books and publications, Tishreen University, 2014.

